

ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОГНУТОГО КРИСТАЛЛА ДЛЯ ВЫВОДА ПРОТОННОГО ПУЧКА ИЗ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА

Обсуждаются методы реализации новых идей в области управления высокоэнергетичными пучками при помощи изогнутых кристаллов с использованием эффекта каналирования. Проводилось моделирование планируемых экспериментов по выводу протонного пучка энергией 8 ГэВ из накопительного кольца и Дебанчера в американской Национальной лаборатории им. Энрико Ферми (далее – Фермилаб). Показано, что в обоих случаях многооборотная эффективность вывода пучка может достигнуть 95–96 %. Применение идеи кристаллического выреза в эксперименте на накопительном кольце способно увеличить эффективность вывода частиц до 97–98 %, а их потери сократить в 2 раза, значительно уменьшив, таким образом, радиационную нагрузку на кристалл. Для упрощения технологии вырез может быть заменен на аморфный слой без существенного уменьшения эффекта. По итогам работы может быть проведена первая в мире экспериментальная проверка идеи кристаллического выреза. Кроме того, изогнутый кристалл возможно использовать как важный ускорительный элемент для вывода высокоинтенсивных пучков из накопительного кольца, которые планируется применять в будущих нейтринных и других экспериментах в Фермилабе.

Моделирование осуществлялось с применением параллельных многопроцессорных вычислений на суперкомпьютере Белорусского государственного университета СКИФ К-1000/2 и персональной вычислительной машине с четырехъядерным процессором Intel Core i7-3610QM.

Ключевые слова: изогнутый кристалл; каналирование; вывод пучка из ускорителя.

The methods of realization of the new ideas in the field of high energy beam controlling with bent crystal with application of the channeling effect are discussed. The simulations of planned experiments of 8 GeV proton beam extraction from the Recycler and Debuncher Rings at the American Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) were provided. It is shown, that in both cases the multimurn efficiency of beam extraction may achieve 95–96 %. The application of the crystal cut idea in the experiment at the Recycler Ring is capable to increase the efficiency of particle extraction up to 97–98 % and to decrease their losses in 2 times, thereby considerably reducing the radiation load of the crystal. For the technology simplification the cut may be substituted by an amorphous layer without a considerable decrease of the effect. As the result of the work the first in the world experimental test of the crystal cut idea may be carried out. Apart from this the bent crystal can be used as an important accelerator element for the extraction of high intensity beams from the Recycler Ring, planned to be used in the future neutrino and other experiments at the Fermi National Accelerator Laboratory.

The simulations were conducted with application of parallel multiprocessor calculations on the supercomputer of the Belarusian State University SKIF K-1000/2 and on a personal computer with quad core CPU Intel Core i7-3610QM.

Key words: bent crystal; channeling; beam extraction from an accelerator.

После закрытия в 2011 г. коллайдера Тэватрона основными направлениями работы Фермилаба стали эксперименты с пучками рекордной интенсивности. Эти пучки будут сталкиваться с неподвижными мишенями с целью генерации интенсивных пучков нейтрино (нейтринные эксперименты), мюонов (эксперимент $\mu 2e$) и др. В этих экспериментах планируется использовать протонный пучок энергией 8 ГэВ, который необходимо выводить из накопительного кольца (Recycler Ring) и инжектировать в ускоритель Main Injector для дальнейшего ускорения и использования.

Процесс вывода пучка из накопительного кольца предложено проводить [1] в режиме *плоскостного каналирования* в изогнутом кристалле [2, 3]. Плоскостное каналирование – это эффект проникновения заряженных частиц в кристалл параллельно его плоскостям, двигающихся в усредненном поле последних. Основное преимущество этого эффекта – низкие потери частиц благодаря малой ядерной и электронной плотности между плоскостями. Кроме того, каналирование позволяет отклонить пучок на достаточный угол за одно прохождение кристалла. Для этого, однако, требуется малая угловая расходимость падающего на кристалл пучка – не более критического угла захвата в режим каналирования, составляющего приблизительно 70 мкрад для протонов энергией 8 ГэВ. Помимо каналирования возможен эффект *объемного отражения* [2] от изогнутой кристаллической плоскости, для которого не требуется настолько низкая угловая расходимость входного пучка. При этом объемное отражение способно отклонять частицы на значительно меньший, чем каналирование, угол, что делает возможным его эффективное применение при многократном прохождении кристалла – за большое количество оборотов на ускорителе. Последнее, однако, малоэффективно на низких энергиях порядка гигаэлектронвольт из-за большого угла некогерентного (*аморфного*) рассеяния на кристалле.

Идея использовать изогнутые кристаллы для отклонения пучков заряженных частиц принадлежит Э. Н. Цыганову [3]. Главное преимущество метода вывода при помощи кристаллов – высокая эффективность без использования громоздких магнитов или электрических дефлекторов, что значительно удешевляет и упрощает установку оборудования. Основная идея метода заключается в постепенном наведении на кристалл высокочастотным электрическим полем отдельных избранных банчей [1]. Отклоненный пучок попадает в септум-магнит для окончательного вывода из ускорителя.

Аналогичный эксперимент при той же энергии планируется на другом кольце Фермилаба – Дебанчере (Debuncher Ring).

Кристаллический вырез для повышения эффективности каналирования

Метод кристаллического выреза был предложен впервые в [4]. Его суть заключается в использовании кристалла с узким вырезом, сделанным в поперечной плоскости по отношению к направлению кристаллических плоскостей (рис. 1). Этот метод позволяет значительно увеличить эффективность каналирования вплоть до 98–99 %.

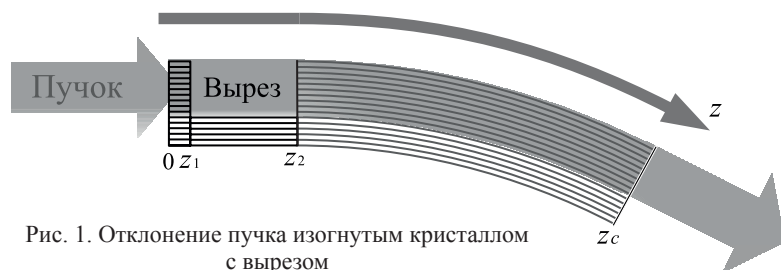


Рис. 1. Отклонение пучка изогнутым кристаллом с вырезом

Основная идея этого метода заключается в том, что частицы, влетающие в кристалл под малым углом, значительно меньше критического угла захвата в режим каналирования θ_L , теряют часть своей поперечной энергии, входя в вырез. При правильно подобранных параметрах выреза частицы при вылете из него получают поперечную энергию значительно меньшую, чем потеряли.

Практически одинаковое влияние выреза на большинство частиц обеспечивается почти одинаковой фазой на входе в кристалл. Это условие, однако, выполняется только при малой угловой расходимости падающего пучка – значительно меньшей критического угла. После такой фокусировки частицы летят с *меньшей* амплитудой колебаний – практически посередине канала, и следовательно, далеко от зоны рассеяния на ядрах. Таким образом, большинство частиц попадет в режим стабильного каналирования, что значительно повысит эффективность их отклонения.

Метод кристаллического выреза может быть пояснен на языке фазовых диаграмм. На рис. 2 показано фазовое пространство в канале в точках кристалла с различными продольными координатами.

Под фазовым пространством подразумевается двумерная область, по горизонтальной оси которой откладывают поперечные горизонтальные координаты частиц x в межплоскостном канале кристалла, а по вертикальной – их поперечные горизонтальные углы по отношению к кристаллической плоскости. Моделирование проводилось для кристалла, который будет использоваться в эксперименте на накопительном кольце (см. далее) при энергии пучка 8 ГэВ и его типичной угловой расходимости при первом падении на кристалл ~ 13 мкрад. На рис. 2 также показан случай кристалла без выреза. Видно, что благодаря вырезу фазовое пространство пучка в канале значительно сужается. Иными словами, действительно основная часть пучка движется в канале далеко от зоны рассеяния на ядрах.

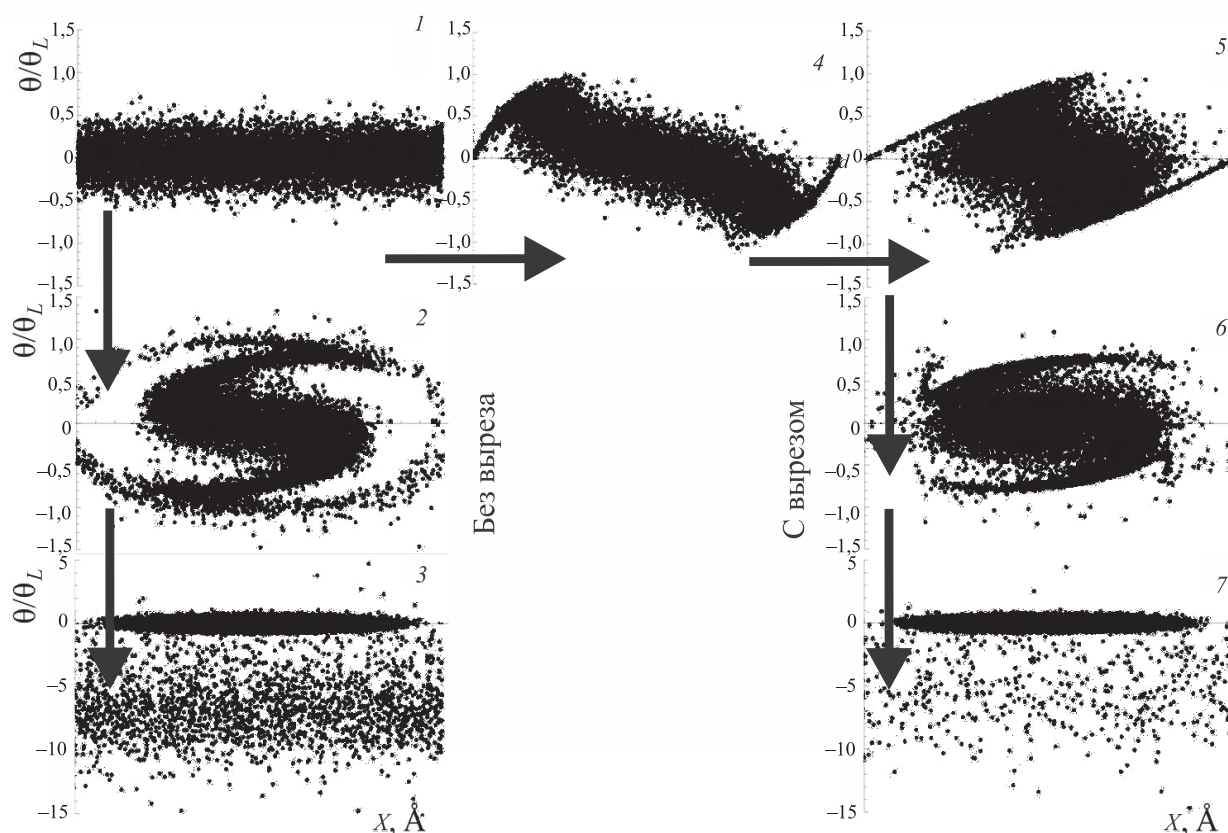


Рис. 2. Фазовое пространство в канале в различных точках изогнутого кристалла:

1 – $z = 0$; 2 – $z = 10$ мкм; 3 – $z = z_c = 1$ мм; 4 – $z = z_1 = 0,82$ мкм; 5 – $z = z_2 = 1,76$ мкм; 6 – $z = z_2 + 10$ мкм; 7 – $z = z_c = 1$ мм

Для подтверждения успешности этого метода на рис. 3, а, была построена зависимость эффективности каналирования (число каналирующих частиц по отношению к общему числу частиц на выходе из кристалла). Параметры выреза z_1 и z_2 определяются параметром ν_0 (угол падения частиц на кристалл, для которого рассчитываются оптимальные координаты выреза z_1 и z_2 [4]). Как было установлено при помощи моделирования, оптимальным для случая накопительного кольца является значение $\nu_0 = 0,5\theta_L$, при котором благодаря небольшой угловой расходимости эффективность каналирования близка к единице для основной массы частиц. Это означает, что большинство частиц, попавших на кристалл в первый раз, в режиме каналирования успешно отклонятся на необходимый угол.

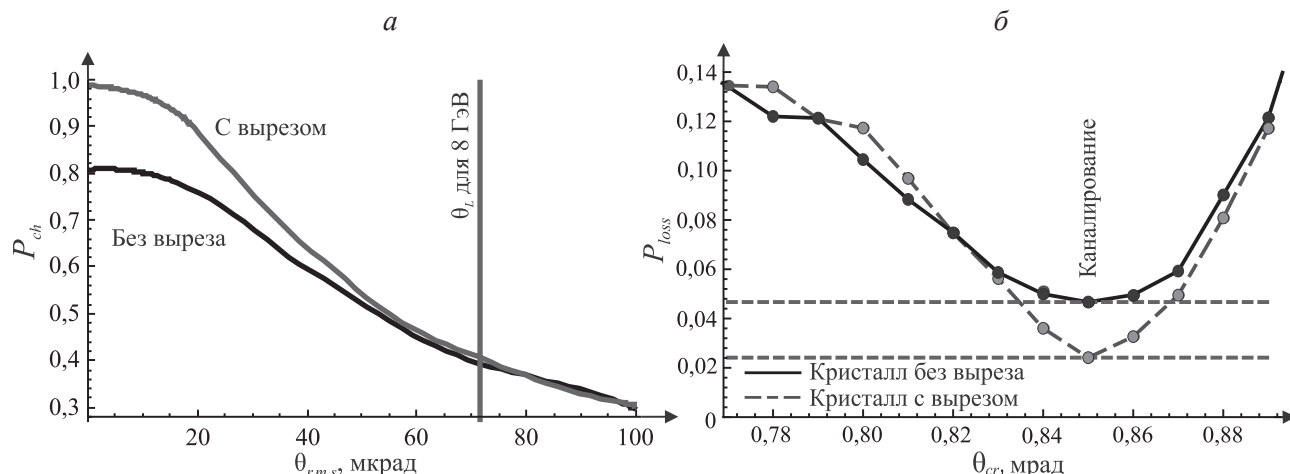


Рис. 3. Эффективность каналирования в зависимости от среднеквадратичного угла падения частиц на кристалл для значения параметра $\nu_0 = 0,5\theta_L$ (а); зависимость доли потерянных частиц от ориентации кристалла при каналировании (б)

Трудность реализации заключается в сложности технологии изготовления кристаллического выреза шириной ~ 1 мкм (при 8 ГэВ). Вместо последнего возможно использование аморфного слоя, изготовить который значительно проще [5]. В результате такой замены кристаллическая структура нарушается аналогично случаю с вырезом.

Результаты, изложенные ниже, показывают, что метод выреза способен значительно увеличить эффективность вывода пучка в эксперименте на накопительном кольце.

Моделирование планируемого эксперимента на накопительном кольце

В эксперименте планируется использовать кремниевый изогнутый монокристалл (Институт физики высоких энергий, г. Протвино, Россия) [6], вырезанный в направлении плоскостей (110), длина которого 1 мм, радиус кривизны 2 м, угол изгиба 0,5 мрад, толщина 1 мм, высота 36 мм. Подобные короткие кристаллы успешно использовались во многих экспериментах по отклонению пучков, в частности в ЦЕРН [7] и Фермилабе [8]. Так называемым углом мискат – углом, характеризующим непараллельность кристаллических плоскостей и поверхности кристалла, – можно пренебречь [9]. Энергия падающего протонного пучка равна 8 ГэВ. Его угловая расходимость достаточно мала для успешного применения метода выреза [9].

Эксперимент моделировался при помощи программы CRYSTAL, основанной на методе, приведенном в [10–11]. CRYSTAL написана на языке Фортран и позволяет моделировать траектории заряженных частиц в кристалле в межплоскостном потенциале с учетом рассеяний на ядрах и электронах. Эта программа была совмещена с программой STRUCT [12], разработанной в Фермилабе для моделирования динамики пучка в ускорителе.

Для получения более точных результатов моделирования в зависимости от широкого диапазона ориентации кристалла программы STRUCT и CRYSTAL были модернизированы для организации параллельных многопроцессорных вычислений. Кроме того, программа способна провести моделирование для заданного диапазона различных начальных параметров. Полученный код выполнялся на суперкомпьютере Белорусского государственного университета СКИФ К-1000/2 и персональной вычислительной машине с четырехъядерным процессором Intel Core i7-3610QM.

Были получены следующие результаты. На рис. 3, б, приведена зависимость доли потерянных частиц от ориентации кристалла и для случая кристалла с вырезом и без выреза [13]. Главный результат для варианта с вырезом заключается в том, что потери частиц уменьшились приблизительно в 2 раза, а эффективность вывода пучка увеличилась с 95–96 до 97–98 %. Кроме того, благодаря уменьшению количества прохождений частиц через кристалл и значительному уменьшению вероятности рассеяния

на ядрах увеличивается радиационная стойкость кристалла. Это важно, поскольку в будущих экспериментах планируется использовать высокоинтенсивные пучки, которые могут повредить кристаллическую решетку.

Основной вывод заключается в том, что пучок в накопительном кольце является подходящим для первой в мире экспериментальной демонстрации эффективности метода кристаллического выреза. Кроме того, он позволит значительно улучшить эффективность вывода пучка и радиационную стойкость кристалла.

Моделирование планируемого эксперимента на Дебанчере

Эксперимент на Дебанчере планируется проводить при той же энергии, что и на накопительном кольце, и с тем же кристаллом. В рамках данной работы проводится моделирование двух вариантов эксперимента. В первом варианте применяется септум-магнит для отклонения пучка и детектор на выходе из ускорителя, в то время как во втором – только детектор и дополнительная система диагностики. Для моделирования динамики пучка в ускорителе использовалась программа STRUCT, а для моделирования процесса отклонения частиц кристаллом применялись и CRYSTAL, и CRYAPR – аппроксимационный код, разработанный в Фермилабе.

Угловая расходимость пучка, падающего на кристалл, в этом эксперименте довольно большая, и поэтому идея кристаллического выреза не может быть в данном случае эффективно применена. Однако условие попадания большинства частиц в режим каналирования выполняется и многооборотная эффективность вывода пучка будет высокой.

Зависимость эффективности вывода от ориентации кристалла для варианта эксперимента с септум-магнитом и без него приведена на рис. 4. Результаты, полученные с помощью программ CRYSTAL и CRYAPR (в этой версии CRYAPR использовалась косинусообразная аппроксимация углового распределения каналирующего пучка на выходе из кристалла, поскольку оно является наиболее близким к моделированию CRYSTAL), соответствуют высокой точности, особенно – в пике каналирования.

В случае использования септум-магнита моделирование проводилось со статистикой 72 000–80 000 частиц для каждого значения угла на суперкомпьютере СКИФ К-1000/2. Погрешность значений эффективности вывода не превышает 3 %.

Во втором случае результаты получены методом Монте-Карло статистикой 192 000–200 000 частиц для каждого значения угла ориентации кристалла, а погрешность эффективности вывода не превышает 0,2–0,4 % [14].

Основной вывод заключается в том, что даже при значительной угловой расходимости пучка, хоть и меньшей критического значения, можно достигнуть многооборотной эффективности вывода пучка в 96 %. Точное значение при нулевой ориентации кристалла: $(96,20 \pm 0,12) \%$ по моделированию при помощи CRYAPR и $(96,19 \pm 0,12) \%$ – при помощи CRYSTAL. Отличие между этими двумя значениями пренебрежимо мало.

В результате моделирования планируемого эксперимента на накопительном кольце в Фермилабе получена эффективность вывода пучка в 95–96 %. Было предложено использовать метод кристаллического выреза, который согласно проведенному моделированию позволит уменьшить потери частиц приблизительно в 2 раза, доведя эффективность вывода пучка до 97–98 %. Это позволяет повысить радиационную стойкость кристалла, что имеет большое значение в будущих экспериментах с пучками высокой интенсивности. Для упрощения производства кристаллический вырез может быть заменен на аморфный слой.

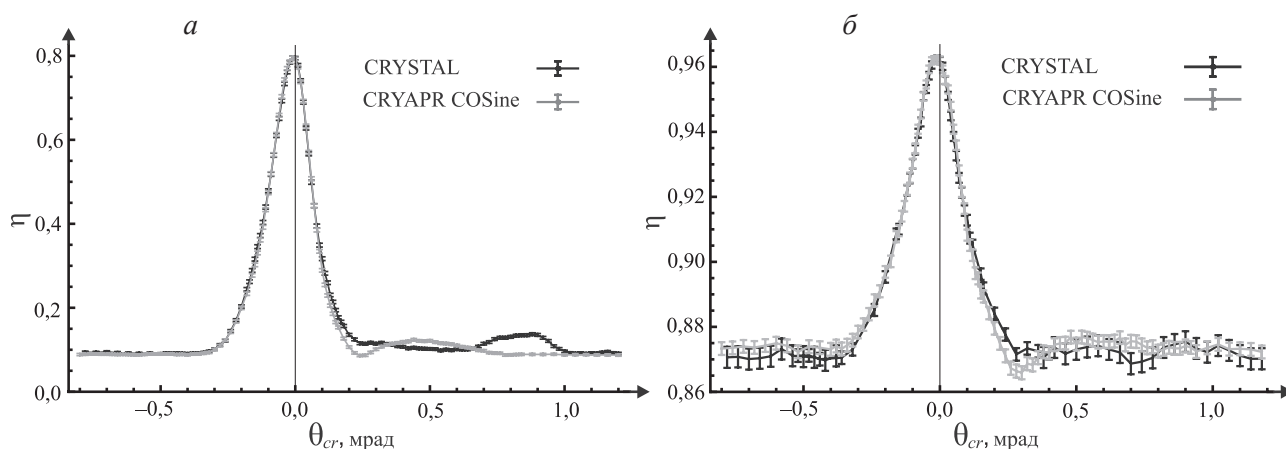


Рис. 4. Зависимость эффективности вывода частиц от ориентации кристалла в эксперименте с септум-магнитом (а) и без него (б)

Таким образом, несмотря на низкие энергии пучка, его вывод из ускорителя при помощи кристалла является оптимальным для накопительного кольца. В дополнение к этому по результатам данной работы может быть проведена первая в мире экспериментальная проверка метода кристаллического выреза.

Моделирование планируемого эксперимента по выводу пучка при помощи кристалла из Дебанчера показало, что, несмотря на большую угловую расходимость падающего пучка, можно достичь эффективности вывода при помощи кристаллов в 96 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ – Минобразование М-2014 (грант № Ф14МВ-010).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shiltsev V. Novel slow extraction scheme for proton accelerators using pulsed dipole correctors and crystals // Proc. of IPAC 2012 (New Orleans, May, 20–25, 2012). P. 517–519.
2. Biryukov V. M., Chesnokov Y. A., Kotov V. I. Crystal channeling and its application at high-energy accelerators. Berlin, 1997.
3. Tsyganov E. N. Some aspects of the mechanism of a charged particle penetration through a monocrystal // TM-682. 1976.
4. Tikhomirov V. V. A technique to improve crystal channeling efficiency of charged particles // JINST. 2007. Vol. 2. P. 08006.
5. Guidi V., Mazzolari A., Tikhomirov V. V. Increase in probability of ion capture into the planar channelling regime by a buried oxide layer // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. P. 165301.
6. Drozhdin A. I. Crystal Extraction from the Recycler Ring [Electronic resource]. Mode of access: <https://indico.fnal.gov/getFile.py/access?contribId=2&resId=0&materialId=slides&confId=5614> (date of access: 31.05.2012).
7. Scandale W., Arduini R., Assmann R., Cerutti F. et al. Strong reduction of the off-momentum halo in crystal assisted collimation of the SPS beam // Phys. Lett. B. 2012. Vol. 714. P. 231–236.
8. Mokhov N. V., Annala G. E., Apyan A., Carrigan R. A. et al. Crystal collimation studies at the Tevatron (T-980) // Int. J. of Mod. Phys. A. 2010. Vol. 25, suppl. 1. P. 98–105.
9. Tikhomirov V. V., Sytov A. I. New ideas for crystal collimation // Proc. of RuPAC 2012 (St. Petersburg, Sept., 24–28, 2012). P. 79–81.
10. Guidi V., Bandiera L., Tikhomirov V. V. Radiation generated by single and multiple volume reflection of ultra-relativistic electrons and positrons in bent crystals // Phys. Rev. A. 2012. Vol. 86. P. 042903.
11. Tikhomirov V. V., Sytov A. I. Multiple volume reflection in one crystal as an origin of significant scattering intensity and radiation power increase // Nucl. Instr. and Meth. B. 2013. Vol. 309. P. 109–114.
12. Baishew I. S., Drozhdin A. I., Mokhov N. V., Yang X. The STRUCT program user's reference manual [Electronic resource]. Mode of access: <http://www-ap.fnl.gov/users/drozhdin/> (date of access: 31.08.2012).
13. Тихомиров В. В., Сытов А. И., Голованов А. А. Новые возможности управления пучками заряженных частиц при помощи кристаллов: материалы 4-го Конгресса физиков Беларуси (Минск, 24–26 апр. 2013 г.). Минск, 2013. С. 15–16.
14. Сытов А. И., Тихомиров В. В. Моделирование выведения высокоинтенсивного протонного пучка из Дебанчера на суперкомпьютере // Сб. науч. работ студентов Республики Беларусь «НИРС 2012». С. 25–26.

Поступила в редакцию 28.03.2014.

Алексей Игоревич Сытов – магистрант кафедры теоретической физики и астрофизики.